

논문 2014-51-7-1

다중 안테나 밀리미터파 시스템에서 피드백 에너지를 절감시키는 하이브리드 빔포밍 기술

(Reduced Feedback Energy Based Hybrid Beamforming for Millimeter Wave MIMO Systems)

노지환*, 이충용**

(Jeehwan Noh and Chungyong Lee[Ⓢ])

요약

본 논문에서는 다중 안테나 밀리미터파 시스템에서 하이브리드 빔포밍의 동작 원리를 이해하고, 피드백 에너지를 줄이기 위한 채널 추정 방식 및 하이브리드 빔포밍 방식에 대한 연구를 진행하였다. 밀리미터파 채널에서 각 경로의 에너지는 경로 이득에 의하여 결정된다는 점을 이용하여, 이를 기준으로 제한된 경로의 수를 기반으로 한 채널 피드백 방식을 제안하였다. 또한, 제한된 피드백 시스템에 적합한 하이브리드 빔포밍 방식에 대한 연구도 진행하였다. 모의실험 결과를 통하여 제안한 기법이 기존의 빔포밍 방식에 비하여 데이터 전송률 측면에서 비슷한 성능을 보이면서도 피드백 에너지를 크게 절감시키는 효과를 확인하였다.

Abstract

We consider a limited feedback based hybrid beamforming which reduces the energy of feedback information. In the millimeter wave channel, some rays with large ray gain dominate energy of the channel. Using this point, we propose a channel feedback scheme that employs limited number of channel rays. Also, we provide a hybrid beamforming scheme for the limited feedback system. Based on the simulation results, the proposed scheme shows a comparable data rate performance with conventional schemes, while it remarkably reduces energy of channel feedback.

Keywords: 밀리미터파 시스템, 하이브리드 빔포밍, 채널 피드백, massive MIMO

I. 서론

5세대 이동통신은 대용량 데이터 전송을 위하여 높은 주파수 대역을 필요로 한다. 이러한 요구 조건을 충족시키기 위한 기술의 일환으로 밀리미터파(millimeter

wave) 전송 시스템이 주목을 받고 있다. 초기 밀리미터파 통신은 실내 환경에서 초당 기가 비트의 전송이 가능하도록 하는 방향으로 연구가 진행되었고^[1], 최근에는 실외 통신 환경에도 적용되어 대용량 데이터 전송을 가능하도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[2]. 밀리미터파 전송 방식의 높은 주파수로 인한 짧은 파장은 안테나 사이의 간격을 좁힐 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에, 많은 안테나 수를 사용하는 massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에 적합하다.

밀리미터파 시스템에서는 높은 주파수 대역 사용으로 인한 신호의 감쇄 및 전달 거리 감소와 같은 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위하여 신호를 안정적으로 전달하기 위한 빔포밍 기술이 필수적으로 요구된다. 기존

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교 전기전자공학부
(Department of Electrical and Electronic
Engineering, Yonsei University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: cylee@yonsei.ac.kr)

※ “이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2013R1A1A2012846)”

접수일자: 2014년01월09일, 수정일자: 2014년05월09일
수정완료: 2014년06월25일

다중 안테나 시스템에서의 빔포밍 방식은 신호를 변화시키기 위하여 베이스밴드(baseband)에서 송신 프리코더와 수신 콤바이너가 설계되었다. 이러한 디지털 빔포밍 방식은 각 안테나 당 RF chain이 하나씩 요구되는데, 안테나의 수가 많아질수록 RF 하드웨어 구현 측면에 있어서 어려움이 커지게 된다. 따라서 massive MIMO 시스템에 기존의 디지털 빔포밍 방식을 그대로 적용하기에는 한계가 존재하며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 빔포밍을 디지털 부분과 아날로그 부분으로 나누어서 수행하는 하이브리드 빔포밍 방식이 제안되었다^[3].

참고문헌 [3]에서 제안된 하이브리드 빔포밍 방식은 송신단에서 모든 채널 정보(full channel state information)를 알고 있어야 한다는 가정이 필요하다. 일반적으로 송신단에서 모든 채널 정보를 알아야 한다는 가정은 수신단으로부터 채널에 대한 모든 정보를 피드백 받아야 한다는 부담이 있다. 더욱이 massive MIMO와 같은 시스템에서는 이러한 채널 피드백 정보량에 대한 문제가 더욱 커지게 된다. 참고문헌 [4]에서는 송수신단에서 부분적인 채널 정보만을 이용하는 하이브리드 빔포밍 방식이 제안되었다. 이 방식에서는 부분적 채널 정보의 습득을 위하여 상향링크와 하향링크의 채널 추정을 각각 수행하는 특징이 있다.

본 논문에서는 수신단에서 송신단으로의 채널 피드백 에너지를 줄이기 위한 방법과 그에 적합한 하이브리드 빔포밍 방식을 제안하고, 기존의 방식들과 비교분석하기로 한다.

본 논문에서는 다음의 표기방식을 가정한다: \mathbf{A} 는 행렬; \mathbf{a} 는 벡터; $(\cdot)^T$ 와 $(\cdot)^H$ 는 각각 transpose와 conjugate transpose; $\|\mathbf{A}\|_F$ 는 \mathbf{A} 의 Frobenius norm; $\|\mathbf{a}\|$ 는 \mathbf{a} 의 2-norm; \mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 의 단위행렬; $CN(m, \sigma^2)$ 은 평균 m , 분산 σ^2 을 가지는 복소 랜덤변수를 나타낸다.

II. 시스템 모델

1. 하이브리드 빔포밍 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 밀리미터파 하이브리드 빔포밍 시스템 모델을 나타낸다. 여기서 송신단의 안테나 수는 N_t , RF chain의 수는 N_{RF}^t , 데이터 스트

림의 수는 N_s 이고, $N_s \leq N_{RF}^t \leq N_t$ 로 가정한다. 그림의 송신단에서 프리코더(\mathbf{F})는 $N_{RF}^t \times N_s$ 의 베이스밴드 프리코더(\mathbf{F}_{BB})와 $N_t \times N_{RF}^t$ 의 RF 프리코더(\mathbf{F}_{RF})로 나뉜다. 송신단에서 전송하는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{s} 는 $N_s \times 1$ 의 심볼 벡터이고, $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H] = \mathbf{I}_{N_s}$ 이다. 또한, 프리코더는 다음의 송신 전력 제한을 만족하도록 설계된다.

$$E[\|\mathbf{x}\|^2] \leq P \quad (2)$$

기존의 하이브리드 빔포밍 시스템과 마찬가지로, RF 프리코더는 채널을 구성하는 송신 어레이 벡터를 이용하여 구현하기로 한다^[3].

채널을 거쳐 수신된 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (3)$$

여기서 \mathbf{H} 는 $N_r \times N_t$ 의 채널 행렬이고, $E[\|\mathbf{H}\|_F^2] = N_t N_r$ 을 만족한다. 또한, \mathbf{n} 은 $N_r \times 1$ 의 노이즈 벡터이고, 벡터의 각 성분은 $CN(0, \sigma_n^2)$ 의 분포를 따른다. 수신단의 구조는 송신단과 반대의 구조로 이루어져 있으며, 수신 콤바이너를 거친 최종 신호는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{n}, \quad (4)$$

여기서 \mathbf{W}_{RF} 는 $N_r \times N_{RF}^r$ 의 RF 콤바이너이고, \mathbf{W}_{BB} 는 $N_{RF}^r \times N_s$ 의 베이스밴드 콤바이너를 나타낸다. 편의를 위하여 이후로는 $N_{RF} = N_{RF}^t = N_{RF}^r$ 로 가정한다. 본 시스템 모델에서의 data rate는 다음과 같다.

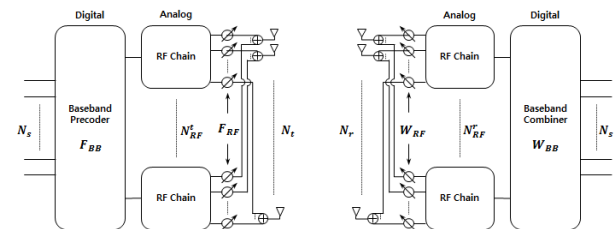


그림 1. 밀리미터파 하이브리드 빔포밍 시스템
Fig. 1. Millimeter-wave hybrid beamforming system.

$$R = \log_2(|\mathbf{I}_{N_s} + P\mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{F}_{BB}^H \mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^H \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB}|), \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{R}_n = \sigma_n^2 \mathbf{W}_{BB}^H \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB}$ 이다.

2. 채널 모델

밀리미터파 채널은 scattering이 적은 특성을 고려한 Saleh Valenzuela 모델이 많이 적용된다^[5]. 본 연구에 사용되는 밀리미터파 채널 모델은 scattering cluster들이 단일 전송 경로를 거친다고 가정하여 다음의 행렬식으로 표현하였다^[3].

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\phi_l^r, \theta_l^r) \mathbf{a}_t(\phi_l^t, \theta_l^t)^H, \quad (6)$$

여기서 L 은 채널을 구성하는 경로(ray)의 수, α_l 은 l 번째 경로의 이득을 나타낸다. 또한, $\phi_l^t(\theta_l^t)$ 과 $\phi_l^r(\theta_l^r)$ 는 l 번째 경로의 송신 및 수신 방위각(고도)을 나타내고, $\mathbf{a}_t(\mathbf{a}_r)$ 는 송신(수신) 어레이 벡터를 의미한다. 본 논문에서는 다수의 안테나를 사용하는 환경을 고려하므로 이에 적합한 uniform planar array(UPA) 기반의 어레이를 가정하고, 그 벡터를 다음과 같이 정의한다^[6].

$$\mathbf{a}^{UPA}(\phi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} ([1, \dots, e^{jkd(m \sin(\phi) \sin(\theta) + n \cos(\theta))}, \dots, e^{jkd((W-1) \sin(\phi) \sin(\theta) + (H-1) \cos(\theta))}]^T), \quad (7)$$

여기서 $k = 2\pi/\lambda$, λ 는 파장, d 는 안테나 간격을 나타낸다. 또한, $0 < m < W-1$ 과 $0 < n < H-1$ 는 각 안테나 축의 인덱스를 나타내고, 안테나의 수 $N = WH$ 이다.

III. 기존의 하이브리드 빔포밍 기술

1. 모든 채널 정보 기반의 하이브리드 빔포밍 기술

하이브리드 빔포밍 시스템이 아닌 일반적인 디지털 시스템에서의 빔포밍 환경에서는, 특이값 분해(singular value decomposition)를 기반으로 한 프리코더와 컴바이너 구성 방식인 고유 빔포밍(eigen-beamforming)이 최적의 기술로 알려져 있다^[7]. 이는 프리코더와 컴바이너를 각각 채널의 우특이 행렬(right singular matrix)과 좌특이 행렬(left singular matrix)로 설정하고, 송신 신호

에 워터필링(waterfilling)을 기반으로 한 전력할당을 하는 방식이다. 하지만 이러한 기술은 디지털 빔포밍 방식을 요구하기 때문에, 본 논문에서 가정하는 그림 1의 시스템에 그대로 적용될 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 하이브리드 빔포밍 시스템 환경에 적합한 특이값 분해 기반 빔포밍 기술이 개발되었다^[3]. 이 기술의 핵심은 기존 디지털 방식에서의 고유 빔포밍 정보, 즉 $\mathbf{F}_{opt}(\mathbf{W}_{opt})$ 를 각 송신단(수신단)에서 알고 있는 상황에서 이에 최대한 근접하는 RF 및 베이스밴드 프리코더(컴바이너)를 설계하는 것이다. 이 기술은 \mathbf{F}_{opt} 의 정보를 알아야 하기 때문에, 송신단에서 모든 채널 정보를 피드백 받는 환경을 가정하고 있다^[3].

2. 부분 채널 정보 기반의 하이브리드 빔포밍 기술

참고문헌 [4]에서는 송·수신단에서 부분적인 채널 정보만을 이용한 하이브리드 빔포밍 기술이 제안되었다. 이 논문에서는 송신단(수신단)에서 발사각(도래각)을 알고 있다고 가정하고 있다. 즉, 송신단에서는 채널을 구성하는 L 개의 송신 어레이 벡터 \mathbf{a}_t 를 구성할 수 있고, 수신단에서는 L 개의 수신 어레이 벡터 \mathbf{a}_r 를 구성할 수 있다. 파일럿 신호를 통하여 각 경로의 이득 α_l 을 추정된 후, 송신단에서 사용하는 부분 채널 정보는 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_t = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_t(\phi_l^t, \theta_l^t)^H \quad (8)$$

마찬가지로 수신단에서 사용하는 부분 채널 정보는 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_r = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r(\phi_l^t, \theta_l^t) \quad (9)$$

위의 부분 채널 정보를 이용하여 송·수신단에서 각각 하이브리드 빔포밍을 수행한다. 하이브리드 빔포밍을 설계하는 방식은 앞에서 언급한 모든 채널 정보 기반의 방식과 동일하게 진행된다.

이 기법에서 사용되는 채널은 맞은편 L 개의 어레이 벡터를 제외하고 진행되기 때문에, 경로의 수가 매우 작을 경우에 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. L 이 커질수록 소실되는 어레이 벡터의 에너지는 많아지게 된다.

IV. 제한된 피드백 기반의 하이브리드 빔포밍 기술

1. 채널 경로의 수를 제한하는 피드백 방식

본 장에서는 피드백 에너지를 줄이면서 하이브리드 빔포밍을 가능하도록 하는 기술에 대하여 알아보도록 한다. 피드백 정보의 양을 줄이기 위하여 밀리미터파 채널의 특성을 이용하기로 한다. 식 (6)에서, 밀리미터파 채널의 각 경로는 송신 어레이 벡터, 수신 어레이 벡터, 경로 이득의 세 가지로 구분될 수 있다. 식 (7)을 보면 각 송수신 어레이 벡터의 에너지는 1이라는 일정한 값을 가진다. 이로부터 각 경로의 에너지는 오로지 경로 이득에 의하여 결정된다는 결론을 내릴 수 있다. 만일 채널의 전체 경로가 아닌 일부분의 경로만을 피드백한다고 가정할 때, 경로 이득이 큰 순서로 경로를 뽑는다면 동일한 정보량으로 최대의 채널 에너지를 복원할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용하여 채널의 피드백 정보량을 제한하기로 한다.

2. 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍 기술의 동작 과정

가. 수신단에서의 과정

앞서 언급한 경로 이득을 기준으로 한 제한된 채널 피드백 과정과 이를 이용한 하이브리드 빔포밍 기술의 동작 과정에 대하여 알아본다. 먼저 수신단에서는 L 개의 채널 경로 중에서 경로 이득의 크기, 즉 $|\alpha_l|$ 가 큰 순서대로 N_{RF} 개의 경로를 선택하고, 선택된 경로의 인덱스를 집합 Ω 에 저장한다. 다음으로 Ω 에 소속된 경로에 해당하는 수신 어레이 벡터를 이용하여 다음과 같이 RF 콤바이너를 구성한다.

$$\mathbf{W}_{RF} = [\mathbf{a}_r(\phi_{\Omega(1)}^r, \theta_{\Omega(1)}^r), \dots, \mathbf{a}_r(\phi_{\Omega(N_{RF})}^r, \theta_{\Omega(N_{RF})}^r)] \quad (10)$$

다음으로 베이스밴드 콤바이너를 설계하기 위하여 \mathbf{W}_{opt} 와 $\mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB}$ 사이의 오차를 다음과 같이 표현하면

$$\|\mathbf{W}_{opt} - \mathbf{W}_{RF} \mathbf{W}_{BB}\|_F, \quad (11)$$

\mathbf{W}_{opt} 와 \mathbf{W}_{RF} 가 주어진 상황에서, 식 (11)을 최소화시키는 \mathbf{W}_{BB} 는 다음과 같다^[3].

$$\mathbf{W}_{BB} = (\mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{RF})^{-1} \mathbf{W}_{RF}^H \mathbf{W}_{opt} \quad (12)$$

나. 밀리미터파 채널 피드백

수신단에서의 콤바이너 구성이 완료된 후에는 선택된 경로의 집합 Ω 에 대한 정보를 송신단으로 피드백하게 된다. 각 경로의 정보는 송신 발사각, 수신 도래각, 경로 이득으로 이루어져 있고, 이러한 경로 기반의 채널 피드백 방식은 massive MIMO 환경에서 안테나 수에 상관없이 경로의 수에 따른 정보량으로 채널을 표현할 수 있는 장점이 있다. 전체 경로 피드백 대비 제한된 경로 피드백 방식의 정보량을 평가하기 위하여 다음의 피드백 정보량 비율을 정의한다.

$$\rho(\%) = \frac{N_{RF}}{L} \times 100 \quad (13)$$

다. 송신단에서의 과정

수신단으로부터 피드백 받은 N_{RF} 개의 경로에 대한 정보를 이용하여 채널을 다음과 같이 재구성한다.

$$\hat{\mathbf{H}} = \sum_{l=1}^{N_{RF}} \hat{\alpha}_l \mathbf{a}_r(\phi_{\Omega(l)}^r, \theta_{\Omega(l)}^r) \mathbf{a}_t(\phi_{\Omega(l)}^t, \theta_{\Omega(l)}^t)^H, \quad (14)$$

여기서 $\hat{\alpha}_l$ 은 기존 채널의 $\sqrt{N_t N_r / L} \alpha_l$ 을 의미한다. 다음으로 송신 방위각과 고도 정보를 이용하여 RF 프리코더를 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{F}_{RF} = [\mathbf{a}_t(\phi_{\Omega(1)}^t, \theta_{\Omega(1)}^t), \dots, \mathbf{a}_t(\phi_{\Omega(N_{RF})}^t, \theta_{\Omega(N_{RF})}^t)] \quad (15)$$

$\hat{\mathbf{H}}$ 로부터 $\hat{\mathbf{F}}_{opt}$ 을 유도한 후, 수신단에서와 유사한 방식으로 베이스밴드 프리코더를 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\mathbf{F}}_{BB} = (\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{F}_{RF})^{-1} \mathbf{F}_{RF}^H \hat{\mathbf{F}}_{opt} \quad (16)$$

마지막으로 $\hat{\mathbf{H}}$ 를 이용하여 위터필링 전력할당을 수행한다.

V. 실험 결과

모의실험 결과에서는 기존의 빔포밍 방식과 제안하는 기법의 성능을 비교하고 분석한다. 모든 안테나는 정사각 UPA를 사용하고 ($W = H = \sqrt{N}$), $d = \lambda/2$ 로 가정한다. 또한, 신호대 잡음비는 $SNR = P/\sigma_n^2$ 이다. 밀리미터파 채널에서 채널 경로의 수 L 은 일반적으로 20개 이하를 고려한다^[3]. 이러한 환경에서 RF chain의

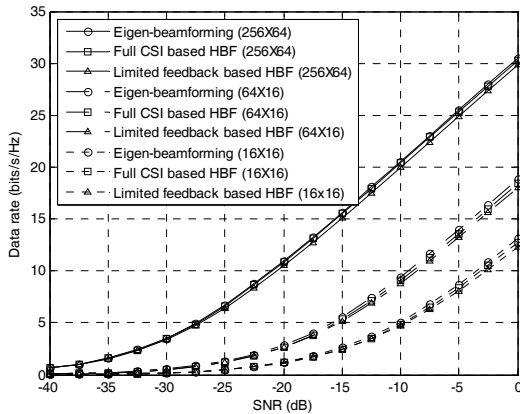


그림 2. 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍의 데이터 전송률

Fig. 2. Data rates achieved by the limited feedback based hybrid beamforming with $N_t \times N_r$.

수를 채널 경로의 수보다 작도록 설정하여 ($N_{RF} \leq L$) 피드백 에너지를 절감하도록 한다.

그림 2는 단일 사용자 시스템에서 최적의 디지털 빔포밍 방식인 고유 빔포밍, 기존 모든 채널 정보 기반의 하이브리드 빔포밍, 그리고 본 논문에서 제안하는 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍의 데이터 전송율을 비교한 것이다. 그림에서 $N_s = 3$, $N_{RF} = 5$, $L = 10$ 으로 가정하였고, 안테나의 수($N_t \times N_r$)가 많을수록 전송율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 모든 안테나 조합의 경우에서 제안하는 기법은 최적의 빔포밍 기법에 비해 전송율이 미세한 차이만을 보인다. 그림에서 고유 빔포밍과 모든 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍은 채널 정보를 모두 알고 있어야 하는 기법이다. 반면에, 제안하는 기법의 피드백 정보량 비율은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{N_{RF}}{L} \times 100 = \frac{5}{10} \times 100 = 50(\%) \quad (17)$$

식 (17)로부터, 제안하는 기법은 다른 두 기법에 비하여 절반의 피드백만을 사용함에도 불구하고 전송율에서는 미세한 차이만을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 피드백 정보량 비율에 따른 제안된 기법의 성능이다. 여기서 (a)는 송신단에서의 채널 추정 오차, (b)는 기존 기법과 제안된 기법의 성능차를 나타낸다.

그림에서 송수신 안테나의 조합은 64×16 , $N_s = 3$, $L = 10$, $SNR = 0$ (dB)로 가정한다. 그림 3의 (a)에서

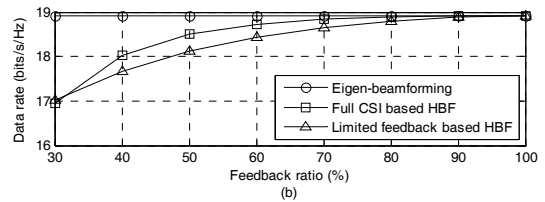
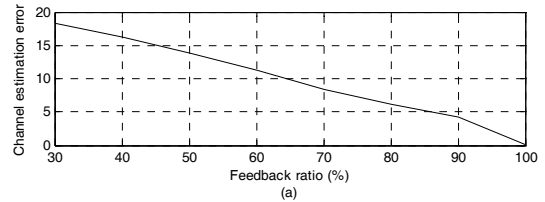


그림 3. 피드백 정보량 비율에 따른 제안된 기법의 성능, (a) 송신단에서의 채널 추정 오차(ϵ), (b) 기존 기법과 제안된 기법의 성능 차이

Fig. 3. Performance of the proposed scheme for an increase of the feedback ratio, (a) Channel estimation error(ϵ) at the transmitter, (b) Performance comparison between the conventional and the proposed scheme.

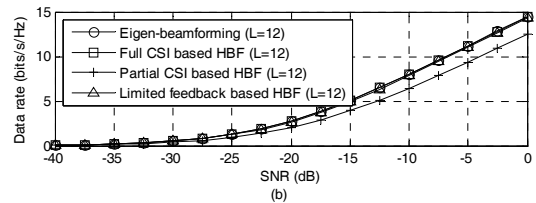
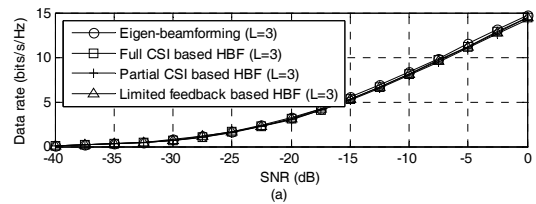


그림 4. 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍과 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍 비교,

(a) $L = 3$ 일 경우, (b) $L = 12$ 일 경우
Fig. 4. Comparison of the partial CSI based hybrid beamforming and the limited feedback based hybrid beamforming, (a) $L = 3$ case, (b) $L = 12$ case.

채널 추정 오차는 실제 채널과 재구성된 채널 사이의 오차를 의미하며, $\epsilon = \|H - \hat{H}\|_F$ 로 정의한다.

또한, 피드백 정보량 비율에 따라 N_{RF} 는 3개에서 10개까지 변화한다. 그림에서 ϵ 는 피드백 정보량의 비율이 높아질수록 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 피드백 비율이 100(%)가 되면 오차가 0이 된다. 채널 추정

오차가 0으로 근접하면서, 고유 빔포밍과 제안된 기법의 전송율 차이가 없어지는 것을 그림 3의 (b)를 통하여 확인할 수 있다.

그림 4는 그림 2의 기법들에 추가적으로 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍 기법의 성능을 비교한 것이고, $N_s = 2$, $N_t = 64$, $N_r = 16$ 을 가정하였다. 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍과 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍을 동등비교하기 위해서는 송·수신단에서 사용하는 채널 정보의 양을 동일하게 설정해야 한다. 이를 위하여 그림 4에서는 수신단에서 모든 채널 정보를 사용하고, 송신단에서 부분적인 채널 정보만을 사용한다고 가정하였다. 수식 (6)으로부터, 채널을 표현하기 위하여 $6L$ 의 스칼라 정보량이 필요한 것을 확인할 수 있다. 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍 방식은 이 중 $4L$ 의 정보량을 사용하고, 제한된 피드백 기반 하이브리드 빔포밍 방식은 $6N_{RF}$ 의 정보량을 사용한다. 따라서, 송신단에서의 채널 정보량을 맞추기 위하여 N_{RF} 와 L 의 비율을 2:3으로 정하기로 한다. 그림 4에서 제안된 기법은 L 값에 상관없이 모든 채널 정보 기반 기법과 유사한 성능을 나타내는 반면, 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍 방식은 L 이 증가하면 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 III장에서 언급했듯이, L 이 커질수록 부분 채널 정보 기반 하이브리드 빔포밍 방식의 채널 에너지 소실이 커지기 때문이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 다중 안테나 밀리미터파 시스템에서 하이브리드 빔포밍의 동작 원리를 이해하고, 피드백 에너지를 절감시키기 위한 채널 재구성 방식 및 하이브리드 빔포밍 방식에 대한 연구를 진행하였다. 밀리미터파 채널에서 각 경로의 에너지는 경로 이득에 의하여 결정된다는 점을 이용하여, 이를 기준으로 제한된 경로의 수를 기반으로 한 채널 피드백 방식을 제안하였다. 또한, 이러한 피드백 시스템에 적합한 하이브리드 빔포밍 방식에 대한 연구도 진행하였다. 모의실험 결과를 통하여 제안한 기법이 기존의 하이브리드 빔포밍 방식에 비하여 데이터 전송율 측면에서 비슷한 성능을 보이면서도 피드백 에너지를 크게 절감시키는 효과를 확인하였다.

REFERENCES

- [1] S. Yong and C. Chong, "An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: potentials and technical challenges," *EURASIP Journal on Wireless Comm. And Net.*, vol. 2007, no. 1, 2007.
- [2] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, 2011.
- [3] O. Ayach and R. Heath, "Low complexity precoding for large millimeter wave MIMO systems," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Ottawa, Canada, Jun. 2012.
- [4] A. Alkhateeb, O. Ayach, G. Leus, and R. Heath, "Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge," in *Proc. of IEEE Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pp. 10-15, Feb. 2013.
- [5] H. Xu, V. Kukshya, and T. Rappaport, "Spatial and temporal characteristics of 60-GHz indoor channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 620-630, 2002.
- [6] C. Balanis, *Antenna theory*. Wiley New York, 1997.
- [7] A. Goldsmith, S. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, 2013.

— 저 자 소 개 —

노 지 환(학생회원)
대한전자공학회논문지
50권 TC편 제5호 2013년 참조

이 충 용(정회원)
대한전자공학회논문지
48권 TC편 제4호 2011년 참조